جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره پانزدهم، پاییز ۱۳۹۴

صص ۳۷-۲۵

ارزیابی تأثیر تزریق یون کلسیم بر مقاومت مکانیکی خاک‌های ریزدانه

رحیم کاظمی[۱]- مربی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

محمدهادی داودی- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۲۸ تاریخ تصویب: ۱۳۹٤/٦/۱۱

چکیده

روش‌های مختلفی برای تثبیت توده‌های طبیعی ناپایدار وجود دارد. یکی از این روش‌ها افزایش پارامترهای مقاومتی خاک از طریق اصلاح کاتیونی و به روش افزودن محلول اشباع آهک تحت نیروی ثقل بـه خـاک است. این تحقیق به ارزیابی تأثیر میزان یون کلسیم مصرف‌شده بر مقاومت تک‌محوری خاک رسی تثبیـت شده با محلول اشباع آهک پرداخته است. ۱۵ نمونه خاک با شرایط یکسان آماده شد و به مدت زمان مشـابه تحت جریان محلول اشباع آهک قرار گرفت. سپس در دسته‌های سه‌تایی و در محفظه مخصوصی به لحاظ رطوبت و دما در دوره‌های زمانی۳، ۷، ۲۸ و ٦۰ روزه، نگهداری و سپس مورد آزمـایش مقاومـت فشـاری تک‌محوری قرارگرفتند. سه نمونه فقط تحت جریان نفوذ آب قرار داده شد و از نتـایج آن بـه‌عنـوان نمونـه شاهد استفاده گردید. با اندازه‌گیری میزان یون کلسیم موجود در نمونه، قبل و بعـد از اصـلاح، میـزان یـون کلسیم ترکیب شده، به‌دست آمد. حداقل یون کلسیم لازم برای افزایش قابل توجـه مقاومـت خـاک، بـرای نمونه‌های دسته سه‌روزه و معادل ۳۲ میلی‌گرم در لیتر با مقاومت نظیر ۱۸۰ درصـد بـه‌دسـت‌آمـده اسـت. حداکثر یون کلسیم جذب شده مربوط به نمونه‌های با دوره عمل‌آوری ۲۸ روزه است که معادل ٤۷ میلـی-گرم در لیتر و حداکثر مقاومت نظیر آن، معادل افزایش ٤۳٦ درصد نسبت به نمونه شاهد به‌دست‌آمده است. حداکثر مصرف در دوره تزریق ۲۸ روزه و عدم تغییر فاحش مصرف یون کلسـیم بعـدازآن، نشـان‌دهنـده آستانه میزان مؤثر یون کلسیم مورد نیاز برای دست‌یابی به حداکثر مقاومت است. همچنین نتیجه‌گیری شـد که مؤثرترین مدت تزریق در فرآیند افزایش مقاومت خاک با محلول اشباع آهک، ۲۸ روز است. همچنـین مشاهده شد که نمونه‌های با زمان عمل‌آوری طولانی‌تر و میزان کلسیم دریافت شده بیشتر، رفتاری مشابه به رفتار سنگ از خود نشان دادند و کمترین میزان کرنش متناظر مقاومت فشاری، به میزان ۲ درصد تغییر شکل نسبی، را در زمان گسیختگی از خود نشان دادند.

کلیدواژه‌ها: مقاومت فشاری تک‌محوری، زمان نگهداشت، یون کلسیم، تثبیت خاک.

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۲۱-٤٤۹۰۱۲٤۰ Email : ra_hkazemi@yahoo.com

۱. مقدمه

افزودن آهک به‌منظور افزایش مشخصه‌های مقاومتی خاک‌های ریزدانه، برای نیل به اهداف مختلف از دیرباز صورت می‌گرفته است. روند تقویت خاک با آهک از طریق واکنش‌های تعویض کاتیونی، سیمانتاسیون و واکنش‌های پوزولانی می‌باشد. افزایش مقاومت ارتباط نزدیکی با میزان آهک‌مصرفی و میزان و نوع کانی رسی دارد. قاعده معمول برای تقویت خاک‌های رسی، افزودن یک درصد وزنی آهک به ازای هر ۱۰ درصد کانی رسی در خاک است و این میزان، بین ۱ و۳ درصد بسته به نوع کانی رسی، متغیر است و به‌ندرت از۸ درصد تجاوز می‌کند، زیرا خاک با کانی رسی بیشتر از ۸۰ درصد نادر است (بل[1]،۱۹۹٦:۲۳۷).

در زمینه افزایش مؤلفه‌های مقاومتی خاک، تحت تأثیر آهک و دو پدیده واکنش پوزولانی و تعویض کاتیونی، مطالعات بسیار گسترده‌ای از زمان‌های بسیار دور انجام شده است. تأثیر درصد آهک در مقاومت فشاری حداکثر توسط ایندراراتنا[2]، مورد بررسی قرار گرفت، ایشان نتیجه گرفت که افزودن تنها ۲ درصد آهک، مقاومت فشاری را حدود ۵۰ درصد افزایش می‌دهد، و اگر این مقدار به ۵ درصد برسد، این مقدار به دو برابر افزایش می‌یابد (ایندراراتنا،۱۹۹٦:٦۹). تأثیر نرمالیته‌های مختلف محلول آهک در افزایش پارامترهای مقاومتی خاک توسط پوی لینگ[3] مورد بررسی قرار گرفته است. ایشان با استفاده از محلول آهک با نرمالیته‌های مختلف، غلظت بهینه محلول آهک را برای تثبیت خاک‌ها مورد مطالعه قرار داده و میزان بهینه محلول آهک را۱/۳۵ مول در لیتر، در زمان نگهداری ۲۸ روز به‌دست آورده‌اند و در این محدوده به مقاومت فشاری حداکثر ۷۳۰ کیلو پاسکال رسیده است (پوی لینگ، ۲۰۰۵:۱).

وجود برخی ترکیبات شیمیایی در خاک می‌تواند اثر حذفی و معکوس در مقاوم‌سازی خاک‌ها با استفاده از آهک داشته باشد. در تحقیقی آزمایشگاهی کویزینیر[4] و همکاران اثر نیترات‌ها، فسفات‌ها و کلریدها را بر روی خاک‌های تثبیت‌شده با آهک مورد بررسی قراردادند و نتیجه گرفتند که ترکیبات مورد آزمایش احتمالاً موجب کاهش مشخصه‌های مقاومتی خاک‌های تثبیت‌شده می‌گردد. آن‌ها نتیجه گرفتند که امکان تعیین یک حد آستانه برای افزودن آهک به این نوع از خاک‌ها، به دلیل پیچیدگی و تنوع ترکیب کانی‌شناسی میسر نیست، (کویزینیر،۲۰۱۱:۲۲۹). تأثیر مقادیر مختلف آهک، بر پایدارسازی خاک‌های رسی که در آن‌ها کانی مونت موریلونیت غالب است، توسط پدارلا[5] و همکاران مورد بررسی قرارگرفت. ایشان نتیجه گرفتند که درصد کانی مونت موریلونیت، اثر قابل توجهی در قابلیت پایدارسازی خاک‌ها توسط آهک دارد و مقادیر

1 Bell
2 Indraratna
3 Pui Ling
4 Cuisinier
5 Pedarla

بالای این کانی موجب آسیب‌پذیر شدن خاک در مقابل فشارهای مکانیکی می‌گردد. ایشان با افزایش ۸ درصد آهک به خاکی با حداقل کانی مونت موریلونیت، حداکثر افزایش مقاومت تک‌محوری به میزان ۱۰٤٦ کیلو پاسکال را گزارش کرده‌اند (پدارلا،۲۰۱۰:۷٦۷).

در میان متغیرهای مختلفی که بر روی مقاومت خاک‌های تثبیت‌شده با آهک تأثیر می‌گذارند، زمان نگهداشت، اهمیت بسیاری دارد که تابعی از حرارت و رطوبت نسبی محیط است. آهک در هفت روز اول به‌سرعت موجب پایداری خاک می‌شود، اما مشخصه‌های فیزیکی و مقاومتی خاک‌ها در طی یک دوره طولانی و با یک نرخ ملایم افزایش می‌یابد و به حداکثر می‌رسد. تأثیر زمان بر مؤلفه‌های مقاومتی خاک تثبیت‌شده با آهک توسط محققین مختلفی شامل، سیواپولاین[1] و همکاران (۲۰۱۰:۱۳۵۸)، کاظمی و داودی (۲۰۱۲:۱٦۰۷) و خلیفه[2] و همکاران (۲۰۱۰:۹۰) مورد بررسی قرار گرفته و میزان تأثیر آن بر افزایش مؤلفه‌های مقاومتی خاک در محدوده‌های زمانی مختلف ارائه شده است. در خصوص مطالعات انجام شده در داخل کشور، می‌توان به تحقیق قابزلو (۱۳۸۰:۱) در زمینه بهبود خصوصیات مکانیکی خاک‌های مارنی با استفاده از پوزولان، اصغری کلجاهی (۱۳۸۱:۱) در خصوص بررسی تأثیر سیمانتاسیون بر مقاومت و تغییر شکل خاک‌های درشت دانه در آبرفت‌های تهران و فرزانه و مصدق (۱۳۸۵:٦) در زمینه تثبیت خاک‌های شور بستر راه با استفاده از آهک را نام برد؛ اما تمامی این تحقیقات برای کاربرد آهک به روش سنتی است که کاربرد آن در پروژه‌های ساختمانی است، در حالی که برای اعمال آهک به توده‌های طبیعی و برجا، روش مناسب‌تری لازم است. داودی (۱۳۸٦:۱) پیشنهاد کرد که آهک به‌صورت محلول اشباع وارد خاک شده و از آن عبور نماید. این محلول در حین عبور از خاک، یون آزاد کلسیم که در اثر انحلال آهک در آب حاصل شده را در خاک به جای می‌گذارد و با انجام واکنش پوزولانی و تبادل یونی با ذرات خاک، موجب اصلاح ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی آن می‌گردد. این روش که در مقایسه با سایر روش‌های رایج بسیار کم‌هزینه است، برای اصلاح توده‌های برجایی که در اثر ضعف ویژگی‌های مکانیکی ناپایدار هستند مناسب می‌باشد. این روش توسط الوندکوهی (۱۳۸۵:۱۲۵) و داودی (۱۳۸۷:۱) و با استفاده از یک مدل فیزیکی مورد بررسی قرار گرفته و به‌وسیله احدی عالی (۱۳۸٦:۱٦۲) توسعه یافت. بر اساس گزارش الوندکوهی، به ازای وارد کردن فقط نیم درصد آهک به یک خاک رسی، چسبندگی آن ۳۰۰٪ و زاویه اصطکاک داخلی آن ۲۲۰٪ افزایش یافته است. این نتیجه از نقطه نظرهای فنی و محیط زیستی حائز اهمیت فراوانی است. وی همچنین رابطه‌ای بین حجم محلول اشباع آهک عبور کرده از خاک و درصد افزایش دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ارائه نمود. افزایش مقاومت مکانیکی خاک‌های ریزدانه در اثر وارد کردن یون کلسیم با استفاده از روش الکتروسینتیک توسط

1 Sivapullaiah
2 Khelifa

داودی و کدیور (۴۷:۱۳۹۰) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج منتشر شده توسط ایشان، بیانگر تأثیر فوق العاده این روش در افزایش جذب یون کلسیم خاک و بالا بردن مقاومت مکانیکی آن است. به‌گونه‌ای که افزایش ۲۲۰ درصدی در پارامتر چسبندگی و همچنین افزایش ۹۲ درصدی در زاویه اصطکاک داخلی گزارش شده است.

در خصوص تقویت مشخصه‌های فیزیکی و مکانیکی توده‌های ناپایدار در منابع طبیعی، به‌منظور کاهش فرسایش و تولید رسوب در حوضه‌های آبخیز و به‌منظور احتراز از اثرات منفی ناشی از افزایش بیش از حد آهک، نیاز به اطلاع از حداقل و حداکثر میزان آهک مورد نیاز برای تزریق در توده‌های ناپایدار برای نیل به اهداف مورد نظر می‌باشد. در این خصوص محققین مختلفی از جمله ادس و گریم و المختار و همکاران از شاخص pH و تحلیل روند تغییرات آن در خاک‌های تقویت شده با آهک، برای برآورد حداقل آهک مورد نیاز استفاده کرده‌اند. ایشان روند تغییرات pH را نشانه واکنش‌های کوتاه‌مدت و طولانی مدت پوزولانی ذکر کرده‌اند (ادس و گریم[1]، ۶۱:۱۹۶۶ و المختار[2] و همکاران:۱۹۱:۲۰۱۰).

باتوجه به‌اینکه، عنصر اصلی مورد نیاز برای ترکیب با کانی‌های رسی و همچنین انجام واکنش‌های پوزولانی، یون کلسیم است. در این تحقیق سعی شده از تحلیل تغییرات میزان مصرف یون کلسیم و مقاومت تک‌محوری خاک رسی، به‌عنوان شاخصی در تعیین آستانه حداقل و حداکثر آهک مورد نیاز برای تقویت نمونه‌های خاک رسی با محلول اشباع آهک، برای کاربرد در تثبیت توده‌های طبیعی و برجا استفاده شود.

۲. مواد و روش‌ها

تمامی مراحل انجام مطالعه، آزمایشگاهی می‌باشد. خاک مورد استفاده از نوع رسی و لای غیر آلی با خاصیت خمیری کم است که در سیستم طبقه بندی متحد با CL– ML مشخص می‌شود و مشخصات مهندسی آن به شرح جدول (۱) می‌باشد.

محلول اشباع آهک از طریق افزودن آهک عبوری از الک شماره ۱۰۰ با نسبت ۵ گرم در لیتر به آب و فرصت دادن به آن برای ته نشین شدن آهک اضافی تهیه شد. سپس برای تهیه نمونه خاک با انجام آزمایش تراکم خاک (به‌روش پراکتور استاندارد)، دانسیته خشک حداکثر و رطوبت بهینه تعیین گردید. با توجه به‌اینکه در طبیعت معمولاً تراکم نهشته‌های طبیعی کمتر از تراکم حداکثر مصالح می‌باشند لذا کلیه نمونه‌ها با ۸۰ ٪ دانسیته خشک حداکثر و رطوبت بهینه استاندارد، در قالب‌های استوانه‌ای به ارتفاع ۱۰ سانتی متر و سطح مقطع ۱۹/۴ سانتی متر مربع، تهیه گردید.

---

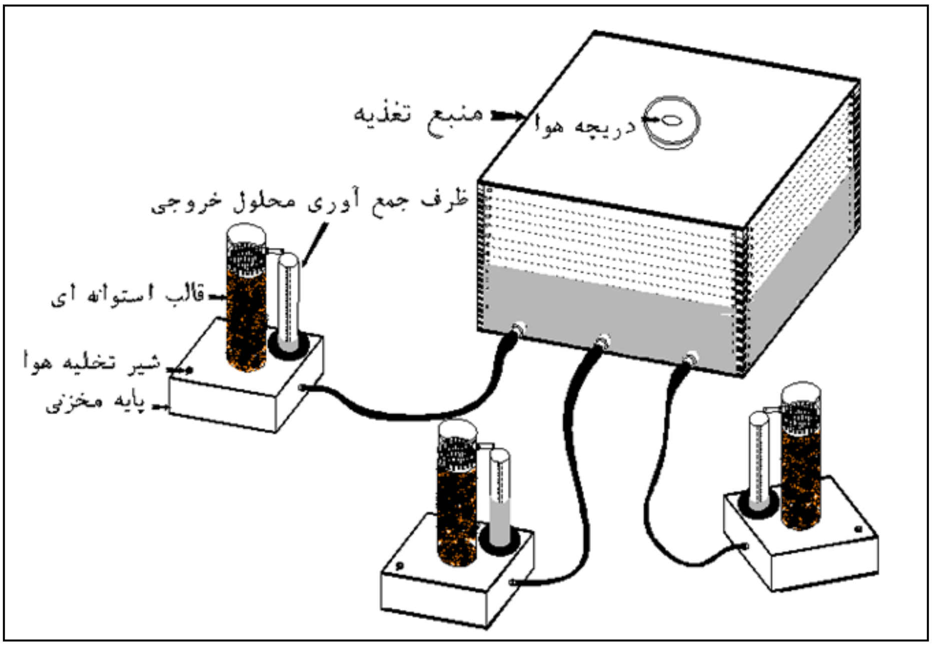
1 Eades and Grim
2 Al-Mukhtar

کلیه نمونه‌ها به‌مدت ٤٨ ساعت در مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه مکانیک خاک پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تحت تأثیر محلول‌اشباع قرار داده شدند. این مدل از پلکسی گلاس شفاف ساخته شده و شامل سه قسمت: قالب استوانه‌ای، پایه مخزنی شکل، منبع تغذیه و ضمائم آن (لوله‌های اتصال، صفحات متخلخل و وزنه‌های نگهدارنده نمونه) می‌باشد. شکل (۱) طرح شماتیک مدل فیزیکی ساخته شده را نشان می‌دهد. پس از اتصال لوله‌ها و وارد شدن جریان محلول به پایه مخزنی، به‌منظور خروج حباب‌های هوا، شیر تخلیه، باز و حباب‌های محبوس شده هوا کاملاً تخلیه گردید. با بستن شیر تخلیه‌هوا، محلول از پایین به بالا شروع به نفوذ به داخل نمونه خاک می‌نمود. برای جلوگیری از تخریب نمونه در اثر پدیده زیرفشار[1] بر روی قسمت فوقانی نمونه، وزنه‌هایی متناسب با بار هیدرولیکی اعمال شد. پس از اشباع نمونه، محلول به آرامی از وجه فوقانی خارج شده و سپس از لوله خروجی تعبیه شده در بالای قالب خارج شده و به درون ظرف مخصوصی که از قبل تهیه شده هدایت و جمع آوری گردید. پس از زمان مورد نظر، لوله‌های ورودی از پایه قطع و نمونه خارج و جهت انجام آزمایش مقاومت تک‌محوری آماده شد. در مجموع تعداد ۱۵ نمونه به روش فوق تهیه گردید. در ۳ نمونه فقط آب عبور داده شد و نتایج آن به‌عنوان نمونه شاهد استفاده گردید. ۱۲ نمونه در دسته‌های سه‌تایی و در محفظه مخصوصی برای کنترل رطوبت و دما در دوره‌های زمانی۳، ۷، ۲۸ و ٦٠، روزه، نگهداری وسپس بر اساس استانداردASTM-D2166-66 مورد آزمایش مقاومت تک‌محوری قرار گرفتند. با اندازه‌گیری میزان یون کلسیم موجود در نمونه، قبل و بعد از ورود محلول‌اشباع، میزان یون کلسیم ترکیب شده به‌دست آمد.

جدول ۱ مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه خاک مورد آزمایش

Values	Basic characteristics	Values	Characteristics
2.63	Specific gravity	8.22	PH
65	Passing200µm sieve (٪)	2.51	EC (µS/cm)
21.64	Liquid limit (٪)	12.81	Ca++ meq/lit
18.92	Plastic Limit (٪)	13.09	Lime (٪)
2.72	Plasticity index (٪)	8.5	HCO3++ meq/lit
CL-ML	Classification(USCS)	15	CL meq/lit
10.9	Optimum water content (٪)	5.39	SO4- - meq/lit
1.88	Maximum dry density gr/cm3	8	Mg+ + meq/lit
		15.87	Na+ meq/lit
		0.22	K+ meq/lit

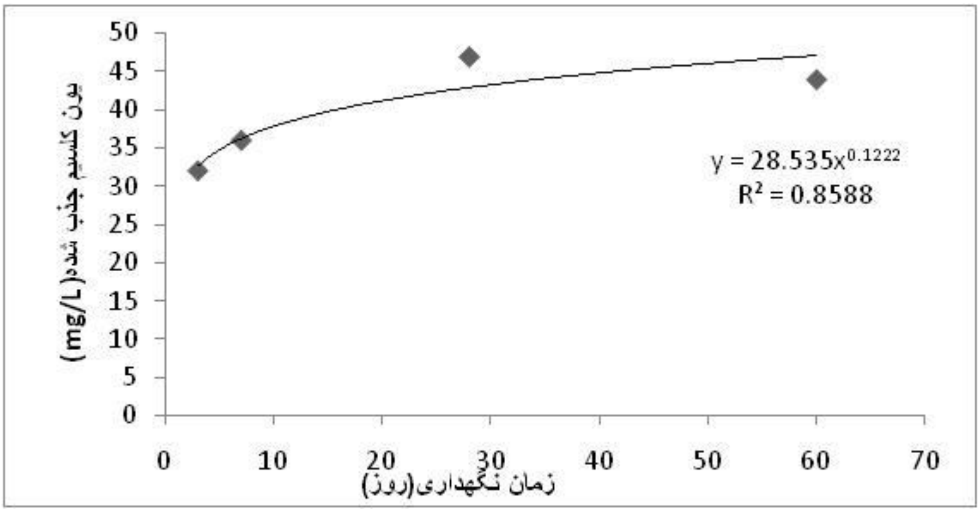
1 Up lift



شکل ۱ طرح شماتیک مدل فیزیکی ساخته شده

۳. نتایج و بحث

جهت تدوین رابطه بین مقدار افزایش مقاومت خاک و میزان یون کلسیم ترکیب شده، مابه التفاوت غلظت یون کلسیم قبل و بعد از عبور محلول اشباع آهک بر حسب میلی‌گرم در لیتر به‌عنوان شاخص میزان کلسیم ترکیب شده با کانی‌های رسی در نظر گرفته شده است. میانگین مصرف در چهار دوره عمل‌آوری مد نظر قرار گرفته و نتیجه در نمودار (۲) ارائه شده است.



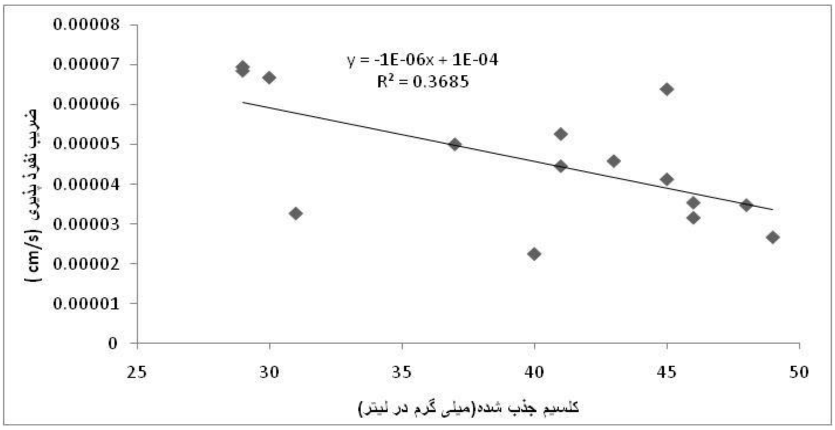
شکل۲ رابطه بین میزان یون کلسیم جذب‌شده و زمان نگهداشت

البته کلیه نمونه‌ها در معرض حجم ثابتی از محلول اشباع آهک قرارگرفته‌اند؛ لذا عامل متغیر، فقط دوره عمل‌آوری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ارتباط بسیار مشخص و مناسبی بین دوره نگهداری و میزان یون کلسیم ترکیب شده مشاهده می‌شود. روند صعودی نمودار تا دوره ۲۸ روزه ادامه دارد و بعدازآن کاهش اندکی در میزان یون ترکیب شده مشاهده می‌گردد و روند مربوطه مجدداً ادامه پیدا می‌کند. حسب نتایج پژوهش بل، (۲۳۷:۱۹۹٦) قابلیت انحلال سیلیکات‌های آلومینیوم درpH حدود ۱۲/٤افزایش می‌یابد و منجر به افزایش سرعت واکنش‌های پوزولانی می‌گردد و مقاومت خاک را در طول زمان افزایش می‌دهد. میانگین pH نمونه‌های مورد آزمایش در این پژوهش ۱۲ است و شرایط محیطی منطبق با نتایج تحقیق نامبرده است.

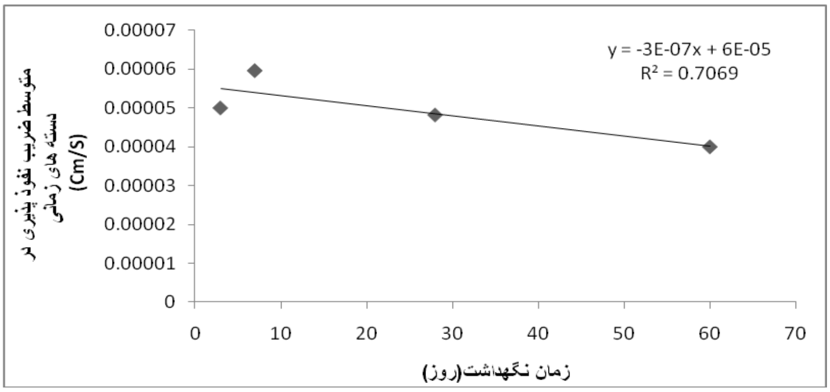
میزان یون کلسیم ترکیب شده در دوره نگهداری کوتاه‌مدت ۳ روزه، به‌عنوان یک آستانه اولیه و حداقل میزان یون لازم برای افزایش محسوس پارامترهای مقاومتی خاک در نظر گرفته شده است. در این تحقیق حداقل یون کلسیم لازم برای پایدارسازی خاک، ۳۲ میلی گرم در لیتر به‌دست‌آمده است؛ و مقاومت نمونه اصلاح شده بعد از سه روز به میزان۱۸۰٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش نشان داد. حداکثر یون کلسیم جذب شده مربوط به نمونه‌های با دوره نگهداشت ۲۸ روزه است که معادل ٤۷ میلی‌گرم در لیتر به‌دست‌آمده است. حداکثر مصرف در دوره ۲۸ روزه و عدم تغییر فاحش مصرف یون کلسیم بعد از آن می‌تواند نشان دهنده آستانه حداکثر یون کلسیم مورد نیاز برای دست‌یابی به افزایش مقاومت قابل توجه باشد. همچنین امکان توصیه دوره ۲۸ روزه در فرآیند افزایش مقاومت خاک با محلول اشباع آهک را میسر می‌سازد.

متناسب با افزایش میزان کلسیم جذب شده و انجام واکنش‌های پوزولانی، انتظار این است که نفوذپذیری نمونه‌ها نیز روند نزولی را نشان دهد. نمودار شماره (۳) نشان می‌دهد که به‌طور معکوس با افزایش جذب کلسیم، میزان نفوذپذیری یک روند کاهشی از خود نشان می‌دهد. این موضوع به دلیل کاهش میزان تخلخل نمونه‌ها در اثر انجام واکنش‌های پوزولانی است. نتایج مشابه در خصوص این روند کاهشی توسط اسماعیلی و فخاریان (۱:۱۳۸۳) و محمود آبادی و مظاهری (۱٤:۱۳۹۱) نیز گزارش شده است.

ارتباط دوره عمل‌آوری و متوسط ضریب نفوذپذیری در دسته‌های زمانی در شکل (٤) نشان داده شده است. حداکثر نفوذپذیری مربوط به نمونه‌های دسته اول و دوم با زمان نگهداشت سه و هفت روزه وحداقل ضریب نفوذپذیری مربوط به دسته نمونه با زمان نگهداشت ٦۰روزه می‌باشد. روند کاهشی نفوذپذیری با زمان نگهداشت با روند تغییرات کلسیم جذب شده و زمان در نمودار (۲) مطابقت دارد و نشان دهنده کاهش نفوذپذیری در نتیجه ترکیب یون آزاد کلسیم و کانی‌های رسی است.



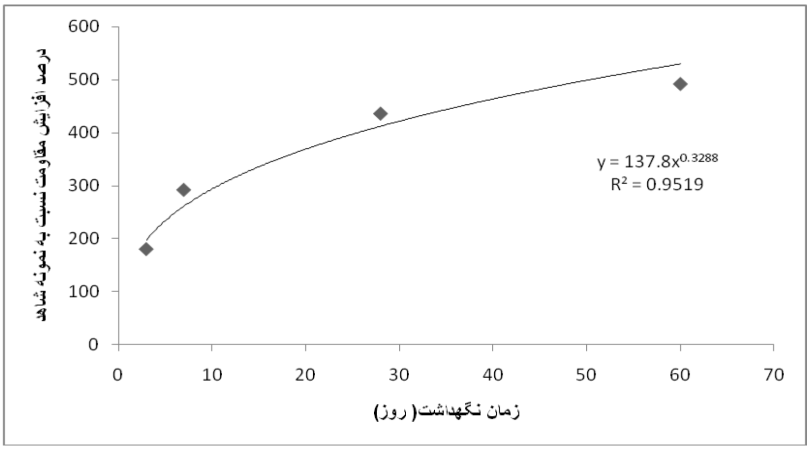
شکل ۳ رابطه میزان کلسیم جذب شده و ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها



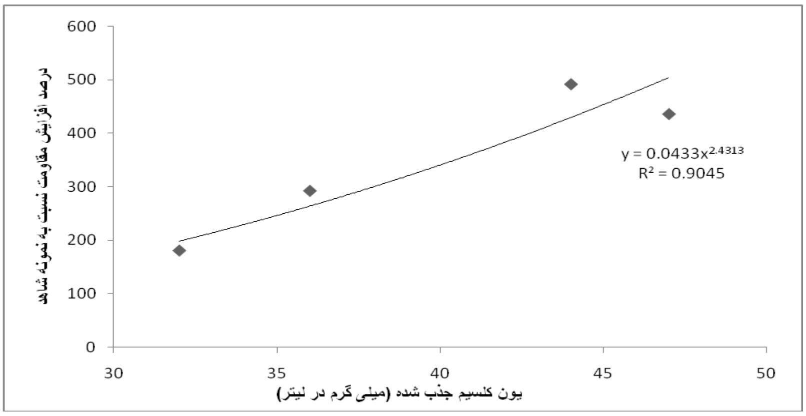
شکل ٤ رابطه زمان نگهداشت و متوسط ضریب نفوذپذیری

مطابق انتظار، مقدار مقاومت تک‌محوری در اثر عبور محلول‌اشباع نسبت به نمونه شاهد با افزایش زمان عمل‌آوری از سه تا بیست و هشت روز افزایش می‌یابد که ناشی از افزایش میزان کلسیم جذب شده در دسته‌های زمانی نظیر می‌باشد. این موضوع در شکل (۵) به وضوح نشان داده شده که در آن ارتباط مستقیم میزان کلسیم جذب شده و تقویت نسبی نمونه‌ها ارائه شده است.

حداکثر مقاومت نظیر برای میزان جذب ٤۷ میلی‌گرم در لیتر و دوره نگهداشت ۲۸ روزه، معادل افزایش ٤۳٦ درصد نسبت به نمونه شاهد به‌دست‌آمده است. در دسته نمونه با زمان نگهداشت ٦۰ روزه، ٤۹۲ درصد افزایش مقاومت، و یون کلیسم مصرفی معادل ٤٤ میلی‌گرم در لیتر، به‌دست‌آمده است. در این دسته، میزان کمتر جذب کلسیم و زمان نگهداشت بیشتر، منجر به افزایش اندک مقاومت نمونه نسبت به دسته زمانی ۲۸ روزه شده است. این تفاوت اندک می‌تواند نشان دهنده، نقش توامان زمان و میزان یون کلسیم ترکیب شده با



شکل۵ روند تغییرات مقاومت با زمان نگهداشت در دسته‌های زمانی

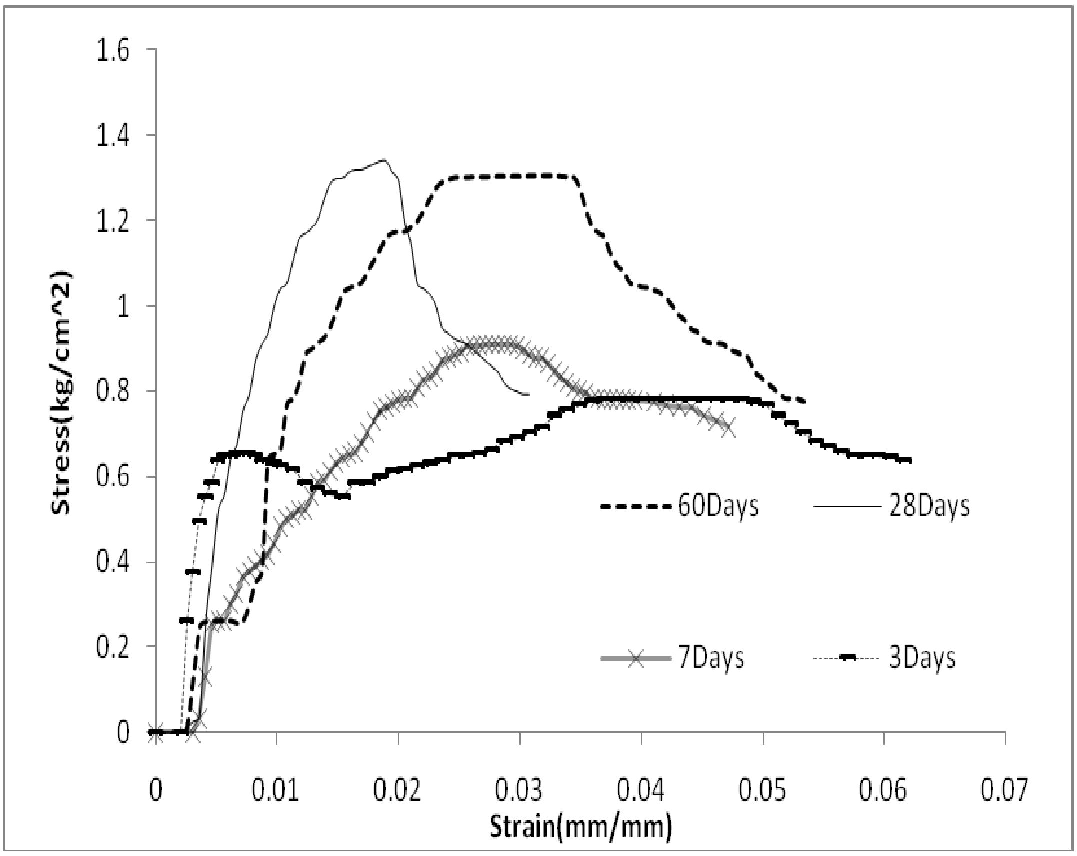


شکل٦ رابطه بین یون کلسیم جذب شده و افزایش مقاومت در دسته‌های زمانی

خاک برای تقویت پارامترهای مقاومتی خاک و تبعیت میزان کلسیم از زمان نگهداری، در نمونه‌های با زمان نگهداشت بالا باشد. همچنین، نشان دهنده این است که زمان نگهداشت ۲۸ روزه برای تقویت نمونه‌ها با محلول اشباع آهک، قابل توصیه است. یکی از واکنش‌های مضر آهک، تشکیل کانی اترینگایت[1] است که سبب افزایش تورم و کاهش مقاومت خاک می‌گردد که لازم است برای درک دلیل این کاهش مقاومت، مد-نظر قرار گیرد (شروود[2]،۱۹۹۳:۱۵۰). البته روند کلی میزان مصرف یون کلسیم، با روند تغییرات مقاومت، هم-راستا است و فراز و فرودهای میزان تغییرات مقاومت و مصرف یون کلسیم روند مشابه‌ای دارد و مؤید ارتباط نزدیک میزان یون کلسیم مصرفی با افزایش مقاومت خاک، صرف نظر از زمان نگهداشت می‌باشد (شکل۵ و٦).

1 Ettringite
2 Sherwood

در شکل (۷) منحنی تنش-کرنش برای نمونه‌های با زمان نگهداشت مختلف، با میزان متغیر یون کلسیم ترکیب شده، ترسیم شده است. همان‌طور که از شکل قابل دریافت است با افزایش زمان نگهداشت و میزان جذب کلسیم، تغییر شکل نمونه‌ها کمتر و رفتار خاک به رفتار سنگ نزدیک‌تر می‌شود، به عبارت بهتر، نمونه‌های با زمان نگهداشت بالاتر و میزان کلسیم دریافت شده بیشتر، رفتاری شکننده داشته و کمترین میزان کرنش متناظر مقاومت فشاری را در زمان گسیختگی از خود نشان می‌دهند. این نمونه‌ها دارای تغییر شکل نسبی ۲ درصد بودند و به‌طور کلی رفتار سخت‌شونده از خود بروز دادند. نمونه‌های با زمان نگهداشت کمتر و مقدار یون کلسیم دریافتی کمتر، در زمان گسیختگی دارای خمیدگی و لهیدگی در قسمت فوقانی بودند و تغییر شکل نسبی، به میزان ٥ درصد، را تجربه نموده‌اند.



شکل۷ نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها دردسته‌های زمانی مختلف

٤. نتیجه‌گیری

در این مقاله امکان تعیین حداقل و حداکثر میزان یون کلسیم مورد نیاز برای ترکیب با یک نمونه خاک ریزدانه و ایجاد شرایط لازم برای انجام واکنش پوزولانی و تقویت خاک ریزدانه مورد بررسی قرارگرفت و نتایج زیر حاصل گردید.

استفاده از محلول اشباع آهک، علی‌رغم قابلیت انحلال کم آهک، در تقویت خاک‌های ریزدانه و بالا بردن مقاومت تک‌محوری آن‌ها بسیار مؤثر است، این امر با بالا بردن pH محیط و افزایش سرعت انحلال سیلیکات‌های آلومینیوم وایجاد واکنش‌های پوزولانی میسر می‌شود.

با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده از میزان یون کلسیم جذب شده در نمونه‌های با دوره عمل‌آوری مختلف، رابطه بین مقدار یون کلسیم و درصد افزایش مقاومت تک‌محوری و همچنین رابطه بین زمان نگهداشت و درصد افزایش مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های شاهد، می‌توان به حداقل و حداکثر آهک مورد نیاز برای افزایش مطلوب مؤلفه‌های مقاومتی خاک دست یافت. در این تحقیق حداقل میزان یون کلسیم برای افزایش مطلوب مقاومت تک‌محوری، معادل ۳۲ میلی‌گرم در لیتر با دوره نگهداری سه روزه و با ۱۸۰٪ درصد افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد به‌دست آمد. همچنین میزان ٤٧ میلی‌گرم در لیتر در دوره نگهداری ۲۸ روزه، با ٤٣٦٪ افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد، به‌عنوان آستانه حداکثری میزان یون لازم برای تقویت به روش تزریق محلول اشباع آهک به‌دست آمد.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با استفاده از امکانات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به انجام رسیده است. از همراهی و مساعدت پژوهشکده کمال تشکر را داریم.

کتابنامه

احدی عالی، وحید؛ ۱۳۸٦. "پایدار سازی توده‌های ناپایدار بـه روش افـزودن محلـول اشـباع آهـک". پایـان نامـه کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز. دانشکده فنی و مهندسی. ص ۱٦۹.

اصغری کلجاهی، ابراهیم؛ ۱۳۸۱. "تأثیر سیمانی شدن بر مقاومت و تغییر شکل خاک‌های درشت دانه با نگرشی بـر آبرفت‌های تهران". پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.

اسمعیلی، فرشید؛ فخاریان، کاظم؛ ۱۳۸۳." بررسی اثر شیرابه و آهک روی نفوذپذیری خاک رس موجـود در محـل دفن زباله‌های شهر تهران خاکچال کهریزک". اولین کنگره مهندسی عمران. دانشگاه صنعتی شریف. ص ۱-۹.

الوندکوهی، حمید؛ ۱۳۸۵. "افزایش مقاومت برشی خاک دریک توده طبیعی لغزشی با استفاده از چاهک‌های حـاوی آب وآهک". پایان نامه کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکـز. دانشـکده فنی و مهندسی.۱۳۰ص.

داودی، محمد هادی؛ ۱۳۸۷." افزایش مقاومت برشی خاک توده‌های لغزنده به کمک محـول اشـباع آهـک". مرکـز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی. ۱٦٦ صص.

داودی، محمدهادی؛ فرید آستانه و حمید الوندکوهی؛ ۱۳۸٦."اثرات کوتاه‌مدت و میان مدت هیدرولیکی و زیست محیطی آب حاوی یون کلسیم بر محیط‌های متخلخل ریزدانه". پنجمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی ومحیط زیست دانشگاه تربیت معلم.

داودی، محمد هادی، کدیور، امین؛ ۱۳۹۰." ارزیابی افزایش مقاومت مکانیکی خاک‌های ریز دانه در اثر وارد کردن یون کلسیم با استفاده از روش الکترو سینتیک". مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران. جلد چهارم. شماره ۱و ۲صص٤۷- ٦۰.

فرزانه، اورنگ. مصدق، عهدیه؛ ۱۳۸٦. "بررسی آزمایشگاهی تثبیت خاک بستر راه کرمان و زنگی‌آباد با استفاده از آهک". سومین کنگره ملی مهندسی عمران. تبریز. صص ۱-۷.

قابزلو، سیاوش؛ ۱۳۸۰. " بهبود خصوصیات مکانیکی خاک مارن با استفاده از پزولان و آهک". رساله کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس. دانشکده فنی مهندسی.

محمودآبادی، مجید؛ مظاهری، محمود رضا؛ ۱۳۹۱. "تأثیر برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بر نفوذپذیری خاک در شرایط مزرعه ای". فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب. سال دوم. شماره هشتم. تابستان ۹۱. صص١٤-۲۵.

Al-Mukhtar, M., Lasledj, A., & Alcover, J. F. (2010). Behavior and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C. *Applied Clay Science*, *50*, 191–198.

Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology*, *42*, 223-237.

Cuisinier, O., Borgne, T. L., Deneele, D., & Masrouri, F. (2011). Quantification of the effects of nitrates, phosphates and chlorides on soil stabilization with lime and cement. *Engineering Geology*, *117*, 229–235.

Eades, J. L., & Grim, R. E. (1966). A quick test to determine lime requirements for soil stabilization. *Highway Research Record*, *139*, 61–72.

Indraratna, B. (1996). Utilization of lime, slag and fly ash for improvement of a colluvial soil in New South Wales, Australia. *Journal of Geotechnical and Geological Engineering*, *14*, 169-191.

Kazemi, R., & Davoodi, M. H. (2012). Investigation on the effect of curing time on uni-axial strength of clayey soils strengthened by saturated lime solution. *World Applied Sciences Journal*, *19*(11), 1607-1612.

Khelifa, H., Ghrici, M., & Kenai, S. (2010). Effect of curing time on shear strength of cohesive soils stabilized with combination of lime and natural pozzolan. *International Journal of Civil Engineering*, *9*(2), 90-96.

Pedarla, A., Chittoori, S., Puppala, A. J., Hoyos, L. R., & Saride, S. (2010). Influence of lime dosage on stabilization effectiveness of Montmorillonite

dominant clays. In H. Mohamad, J. Hussein, B. Anderson, & M. William (Eds), *Art of foundation engineering practice congress* (pp. 767-776). United States: American Society of Civil Engineers.

Pui Ling, N. G. (2005). *Determination of optimum concentration of lime solution for soil stabilization* (Unpublished master's thesis). Universiti Teknologi, Malaysia.

Sherwood, P. T. (1993). *Soil stabilization with cement and lime.* UK: Transport Research Laboratory.

Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A., & Ramesh, H. N. (2000). Strength behavior of lime-treated soils in the presence of sulphate. *Canadian Geotechnical Journal*, *37*, 1358–1367.